実験トランジスタ・アンプ設計講座

黒田 徹

●実用技術編

第10章　回路シミュレータ SPICE 入門（29）

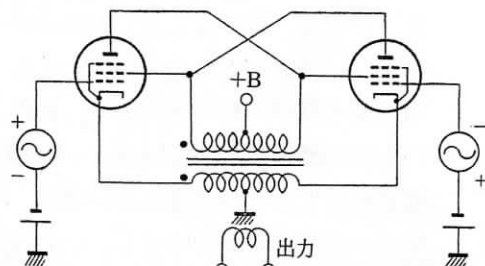
マッキントッシュ出力段回路の特長

今回はマッキントッシュ(風)パワー・アンプをシミュレーションしましょう．

まず，マッキントッシュ回路を第1図に示します．その特長は，

(1) 出力トランスの1次側コイルを分割し，出力電圧の50%をカソードに負帰還しているので，直線性が高く，出力インピーダンスが低い．

(2) カソード側とプレート側のコイルをバイファイラー巻きで密結合しているので，B級動作でもスイッチング・トランジェントひずみを発生しない．

(3) スクリーン・グリッドを他方のプレートに接続しているので，各球のスクリーン・グリッド～カソード間交流電圧がゼロとなる．すなわち，信号が印加されてもスクリーン・グリッド～カソード間電圧は常に一定のDC電圧である．

これらを要約すると，「マッキントッシュ回路は，5極管動作ながら，出力インピーダンスは3極管より低く，かつ低ひずみ」といえます．

出力段のシミュレーション

上の特長を検証するために，第2図の回路でシミュレーションしてみましょう．出力管はEL 34です．

(1) トランスの1次2次巻数比

トランスの1次側には同じ巻数のコイルが4組あります．1次側の1つのコイルと2次側コイルの巻数比（変成比）を設定しましょう．

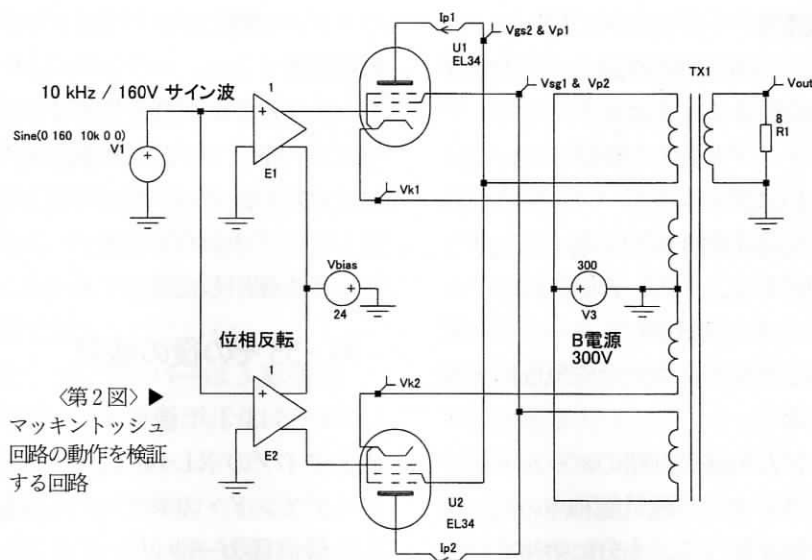
さて，第1図の回路は第3図の等価回路で表わせます．話を簡単にするためA級PP動作を仮定すると，各球の交流プレート電流 i_{p1}, i_{p2} は同じ大きさで，流れる方向が逆です．したがって電源の内部を流れる i_{p1} と i_{p2} は打ち消し合い，電源電流の交流成分はゼロになります．つまり，信号電流は2個のEL 34と4個のコイルの直列パスで還流します．

4個のコイルの直列インピーダンスを，EL 34標準PPの1次インピーダンス＝5 kΩに設定すると，1次側の1つのコイルのインピーダンスZは，

$$Z=\frac{5000\Omega}{4^2}=312.5\Omega \quad \cdots(10\text{-}84)$$

となります．したがって1次側の1つのコイルと2次側のコイルの巻数比Nは，

$$N=\sqrt{\frac{8\Omega}{312.5\Omega}}=0.16 \cdots(10\text{-}85)$$

〈第1図〉マッキントッシュの出力段

〈第2図〉▶ マッキントッシュ回路の動作を検証する回路

となります．

(2) **出力トランスの設定**

SIMetrix の回路図ウィンドウのメニューから［Place］→［Passives］→［Ideal Transformer……］をクリックし，現れたダイアログボックスを**第4図**のように編集します．すなわち，

#Primaries：4
#Secondaries：1
Primary 1 Inductance：10
Inter-Primary Coupling：1
Inter-Secondary Coupling：1
Primary-Second Coupling：1
Define Turns Ratio to Primary 1
　Prim 2：1
　Prim 3：1
　Prim 4：1

〈第5図〉 EL 34 各部電圧波形

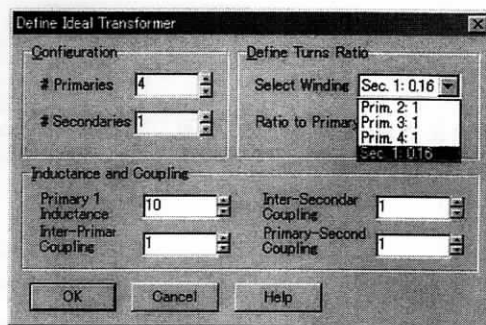
〈第3図〉 マッキントッシュ回路のプレート電流（交流分）の流れ

　Secl：0.16

1次側の各コイルのインダクタンスは 10 H です．4個直列で 160 H になります．1次側各コイル間の結合係数は1としました．1次コイル～2次コイル間の結合係数も1としています．

入力信号は 10 kHz/片ピーク振幅 160 V のサイン波です．EL 34 のグリッド・バイアス電圧は－24 V．AB 級動作です．

E 1 と E 2 は電圧制御電圧源で，ゲインは1倍です．E 2 は位相反転させています．

(3) **プレート（スクヒーン・グリッド）電圧波形およびカソード電圧波形**

〈第4図〉 トランスのパラメータ設定

第3図の回路の過渡解析結果を**第5図**に示します．スクリーン・グリッド～カソード間電圧は確かに 300 V 一定です．

プレート電流波形と2次側出力電圧波形を**第6図**に示します．無信号時のプレート電流は 44 mA で，ピーク・プレート電流は 218 mA，典型的な AB 級動作になっています．2次側出力電圧は，8 Ω 負荷に対し ±22 V です．出力電力 Po は，

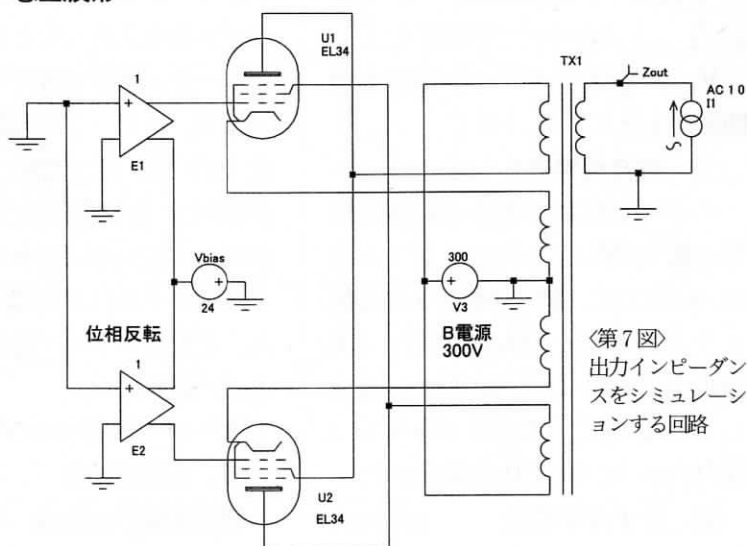
$$P_o=\frac{22^2}{2\times 8}=30.25\,[\mathrm{W}]$$

となります．

(4) **出力インピーダンス**

トランス2次側の出力インピーダンスをシミュレーションしてみましょう．入力端子を短絡し，出力端子に 1 A の AC 電流を注入したとき，出力端子に発生する AC 電圧が出力インピーダンスです（**第7図**）．

出力インピーダンスの周波数特性は 10 Hz～100 kHz において 0.87

〈第6図〉 EL 34 の tp 波形と OPT 2 次側電圧波形（8 Ω）

〈第7図〉 出力インピーダンスをシミュレーションする回路

〈第9図〉▶
(a)マッキントッシュ風出力30Wパワー・アンプの原理回路
(b)点線のように接続を変え，×点を切断すると，ドライブ段がブートストラップされる

Ωとシミュレーションされました(第8図).

マッキントッシュ風30Wアンプ原理回路

第9図の回路は，第2図の出力段にFET差動増幅回路と12AU7ドライブ段を加えたものです.

初段からEL34のグリッドまでを直結にするため，EL34のカソード電位をV5によって300V持ち上げています.

EL34のグリッド・バイアス電圧V_{gk0}は次式で与えられます.

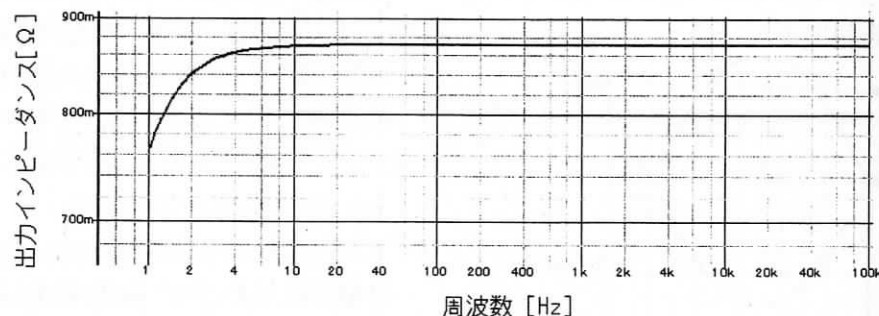
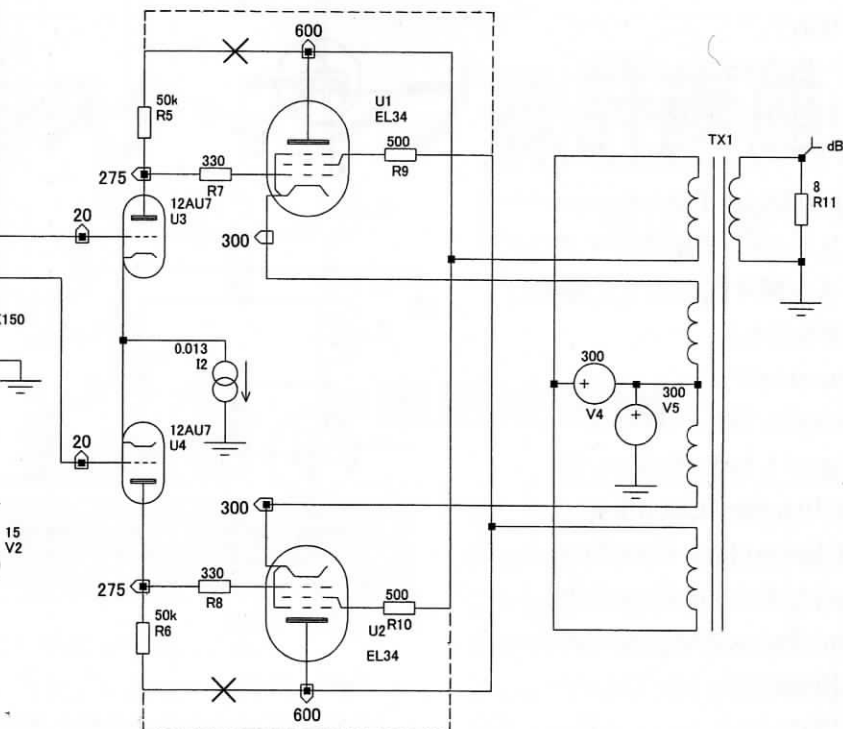
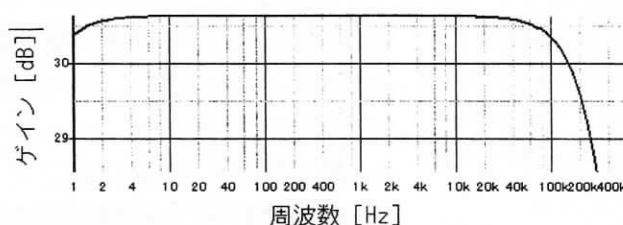
$$V_{gk0}=V_{pk0}-R_5I_2/2$$
$$=300-50\times6.5=-25[V] \quad \cdots\cdots(10\text{-}86)$$

(V_{pk0}：EL34無信号時プレート・カソード間電圧)

V_{gk0}は初段のドレイン電圧と無関係に定まります.

(1) 周波数特性

ゲイン周波数特性のAC解析結果を第10図に示します．ゲインは30.6dBです．結合係数＝1の理想トランスを使っているので，100kHzのゲインは0.3dBしか減衰していません．低減のゲインは1Hzにおいて0.2dBの減衰です.

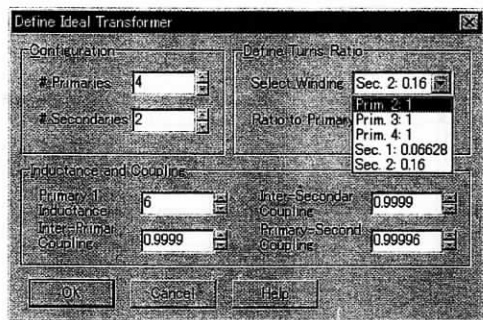
(2) ひずみ率特性

〈第8図〉出力インピーダンスの周波数特性

〈第10図〉
第9図のアンプのゲイン周波数特性

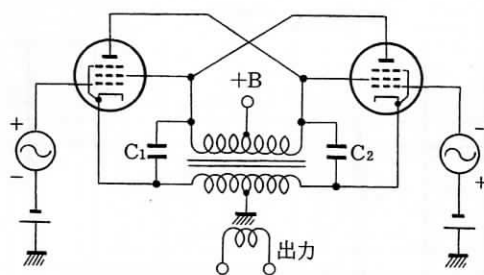
片ピーク振幅500mV/1kHzのサイン波を入力したときの出力電圧のフーリエ解析結果を第11図に示します．片ピーク出力電圧(1kHz)は16Vで，第3調波ひずみ率は約2%です．出力段に50%の局部帰還がかかっているにもかかわらず，ひずみ率はそれほど改善されていません．これはドライブ段のひずみ率が大きいためです.

(3) ブートストラップでひずみ率を改善する

第9図(a)の回路は，ドライブ段のプレート負荷抵抗R_5をU1のプレートに接続していますが，第9図(b)のように，R_5をU1のスクリーン・グリッドに接続し，またR_6をU2のスクリーン・グリッドに接続すると，ひずみ率が激減します.

なぜなら，スクリーン・グリッド～カソード間電圧は常に300V一定なので，ドライブ段のプレート負荷抵抗がEL34のカソードからブートストラップされるからです.

第9図(b)の回路の周波数特性を第12図に示します．ゲインは33.0dB

◀〈第15図〉
タンゴ CRD-5出力トランスのパラメータ設定

〈第16図〉▶
島田聡氏によるクロスシャント PP. C_1C_2 でコイルをシャントする

ュ風パワー・アンプを**第14図**に示します．R 7＝R 8＝R 11＝R 12＝56 Ω はトランスの巻線抵抗です．

R 26＝161 mΩ と R 1＝388 mΩ は2次巻線抵抗，C 2＝C 3＝C 6＝C 7＝2060 pF は巻線容量です．

トランスの設定を**第15図**に示します．各1次側コイルのインダクタンスは6 H（すなわち4個直列で96 H）です．1次コイル～2次コイル間の結合係数は 0.99996，1次コイル間および2次コイル間の結合係数は 0.9999 としました．

実際の1次コイル間結合係数は不明です．そこで結合係数が不足する場合も想定し，EL34のスクリーン・グリッド～カソード間に 100 μF を接続しています．すなわちクロス・シャント PP（**第16図**）にしています．

(2) 定電流回路

初段差動増幅回路のテール電流は TL 431 と 2 SC 1775 A で安定化しています．テール電流 I_{tail} の値は次式で与えられます．

$$I_{tail}=\frac{V_{ref}}{R_{18}}=\frac{2.49}{620}=4.02\,\mathrm{mA} \quad \cdots\cdots (10\text{-}87)$$

2段目の 12 AU 7 差動増幅回路のテール電流も TL 431 と 2 SC 2705 で安定化してあります．

EL 34 のグリッド・バイアス電圧は，VR 2 を調整し，－24.16 V に設定しています．

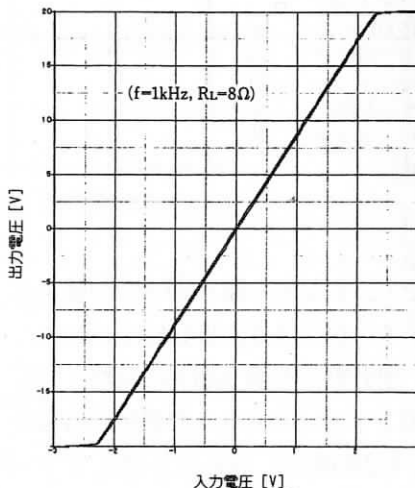
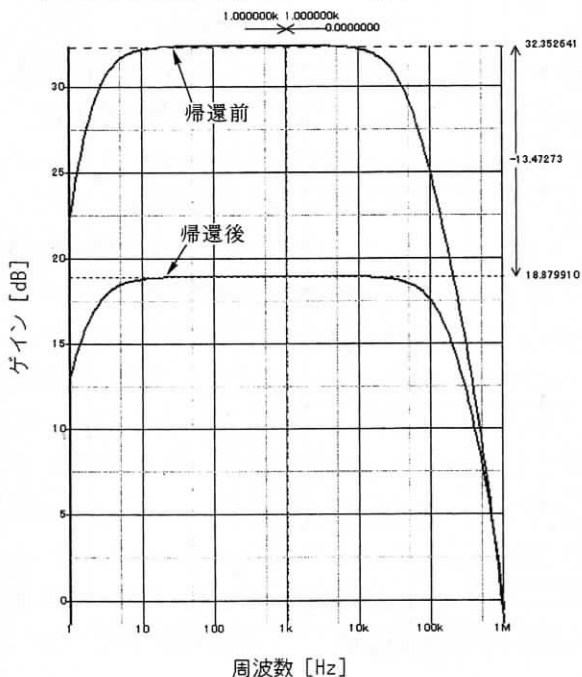
(3) 周波数特性

ゲイン対周波数特性を**第17図**に示します．トランスの2次側から 13.5 dB の負帰還をかけています．**第15図**の C 4＝C 5＝15 pF は位相補償容量です．

(4) ひずみ率特性

片ピーク振幅 1.85 V/1 kHz の正弦波を入力したときの 8 Ω 端子出力電圧のフーリエ解析結果を**第18図**に示します．出力電圧（1 kHz）は 16.2 V で第3調波ひずみ率＝0.043%となっています．

(5) 入出力特性

片ピーク振幅 3 V/1 kHz の正弦波を入力したときの入出力電圧のリサージュ図形を**第19図**に示します．最大出力電圧は±20 V 程度で，最大出力電力は約 25 W です．

〈第19図〉 第14図アンプの入出力特性

◀〈第17図〉
第14図のアンプのゲイン周波数特性

〈第18図〉▶
第14図のアンプの出力電圧（R_L 8 Ω）のフーリエ解析結果